

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107344

模块化可重构外肢体机器人*

赵思恺, 李长乐, 张宗伟, 赵杰, 朱延河

(哈尔滨工业大学 机器人技术与系统国家重点实验室 哈尔滨 150001)

摘要:针对单人无法独立完成的作业任务,需要额外辅助的需求,提出并研制了一种模块化、可重构的外肢体机器人,该机器人由多个结构、功能相同的基本模块单元串联组成。为了实现模块化外肢体机器人的模块连接配置与变形重构能力,分析了基本模块单元的结构、功能需求,根据需求设计了基于舵机驱动的基本模块单元。每个模块单元由两个楔形子模块共轴相互转动构成,形成一个转动自由度。设计了基于磁铁吸附的机械连接机构,可以实现两个模块间的快速连接与分离;提出了双排金属触点间隔错位连接方法,保证两个模块单元间实现可靠的电气系统连接。划分了双模块串联条件下4种不同的连接方位,得出了外肢体机器人的构型配置种类与串联模块个数关系。面向具有任意模块个数、不同连接方位的外肢体机器人,建立了基于虚拟转轴的模块化外肢体机器人通用正向运动学模型。对基本模块的转动能力、承载能力、快速连接能力以及外肢体机器人在焊接过程中,辅助操作人员夹持导线、递送电话等能力进行了试验,验证了所提出的新型模块化外肢体机器人的辅助能力。

关键词:可穿戴机器人;外肢体机器人;模块化机器人;可重构机器人;人机协作

中图分类号: TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

Modular and reconfigurable supernumerary robotic limbs

Zhao Sikai, Li Changle, Zhang Zongwei, Zhao Jie, Zhu Yanhe

(State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Aiming at the requirement that the operation tasks that cannot be completed by one person alone need additional assistance, the modular and reconfigurable supernumerary robotic limb is proposed and developed, which is composed of several basic modules connected in series with the same structure and function. In order to realize the module connection configuration and the shape reconfiguration capacities of the modular supernumerary robotic limb, the structure and function requirements of basic module units are analyzed. According to the requirements, the module unit based on steering engine driving is designed. Each unit is composed of two wedge-shaped sub-modules rotating coaxially with each other to form a rotational degree of freedom. The mechanical connection mechanism based on magnetic attraction is designed, which can realize the quick connection and separation of two modules. Furthermore, the connection method using double row metal contacts with interlacing disalignment is proposed to ensure the reliable electrical system connection of two module units. Four different connection orientations of two modules connected in series are clarified. The relationship between the configuration types of the supernumerary robotic limb and the number of modules is obtained. Facing to the supernumerary robotic limb with arbitrary number of modules and different connection orientations, the general forward kinematic model of the modular supernumerary robotic limb based on virtual axis is established. Experiments were carried out aiming at the rotation, carrying and fast connection capacities of basic modules, as well as the abilities of assisting the operator to carry wire and deliver telephone of supernumerary robotic limb in welding process, which verifies the assistant ability of the proposed new modular supernumerary robotic limb.

Keywords: wearable robot; supernumerary robotic limb; modular robot; reconfigurable robot; human-robot cooperation

收稿日期: 2021-01-06 Received Date: 2021-01-06

* 基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1305400, 2017YFB1302301)、国家自然科学基金联合基金(U1713201)、国家自然科学基金(61673137, 91648201)项目资助

0 引言

随着机器人技术的快速发展,机器人与人的结合越来越紧密。同样,人们对于机器人的应用需求越来越多样与强烈。诸如服务机器人、可穿戴机器人、人体功能增强与辅助机器人应运而生,并快速发展起来。上述机器人可以增强人体功能、辅助人体操作、增强人体生活与作业能力^[1-3]。外肢体机器人^[4-6]是一种可穿戴的人体辅助机器人,可以作为人类的额外肢体与人协同作业,进行诸如辅助抓取、递送工具、辅助支撑等。解决生活或工业上单人双手无法完成的操作任务,同时适用于复杂狭小空间中无法多人同时进入,或工作姿态不佳的应用场景。

目前,国际上对此类外肢体的研究以刚性为主。美国麻省理工学院的Parietti等^[7]首先提出了外肢体机器人(*supernumerary robotic limb*, SRL)的概念并做了较为系统的理论研究。同时面向飞机制造装配,与波音公司合作开展了的外肢体机器人的应用研究^[8]。Parietti等^[9-10]提出并研制了一种穿戴在腰部的外肢体机器人,具有两条4自由度的外肢体臂,可以通过抵住墙壁或地面,支撑稳固操作人员身体从而解放双手进行钻孔工作,省力舒适地完成作业。

同时还设计了穿戴在肩部的外肢体^[11],具有两条5自由度的外肢体臂,对人体头顶空间的操作对象进行支撑,辅助操作人员独立完成零部件的安装固定,简化了工作人员操作步骤,降低了工作量。Sasaki等^[12-13]研制了一种灵巧型双臂外肢体,建立了人体腿部与外肢体臂、脚部与末端执行手爪之间的动作映射,通过人体下肢动作操作外肢体配合操作人员完成抓取与递送工具的应用演示。Vatsal等^[14]研制了一种穿戴于人体前臂的外肢体机器人,结构简单、质量轻,具有伸缩能力,可以辅助人体进行抓取杯子。Zhang等^[15]提出了一种串并联结构外肢体,具有4条3自由度的串联结构外肢体臂,任意两条可以重新组成并联结构,不同的构型可以实现操作辅助、负载助力等工作模式。Hao等^[16]提出了一种可以作为下肢辅助的外肢体,在人体负重行走过程中提供支撑助力。此外,研究人员对外肢体的辅助打鼓、辅助采摘、辅助抓取等操作做了一些研究与演示试验^[17-19]。同时,研究人员基于外肢体概念还设计研制了外手指机器人,辅助人体进行单手持握、抓取等操作^[20-24]。除了上述刚性外肢体,Nguyen等^[25]研制了基于气压驱动的柔性外肢体(*soft poly-limbs*, SPL),结构上仿照大象鼻子进行设计,能够提起自身重量2.35倍的负载,具有较高的灵活度和柔顺性,针对穿戴者周身物品抓取功能进行了演示试验。综上所述,外

肢体机器人作为新兴的研究方向,国内外的相关研究还处于初步探索阶段,在外肢体机器人本体、驱动、感知、操控等方面的研究还有很大的发展空间。

本文提出一种模块化、可重构外肢体机器人,设计并研制了基本模块单元与外肢体机器人原理样机,建立了模块化外肢体机器人通用的正向运动学模型,并对其工作空间进行了分析;同时,针对基本模块单元的转动能力、承载能力、快速连接能力以及外肢体辅助夹持、递送等能力进行了试验,验证了所提出模块化外肢体机器人的辅助操作能力。

1 结构设计

模块化可重构外肢体机器人的辅助作业概念如图1所示。该外肢体的本体可以由多个结构相同的基本模块单元串联组成,每个模块具有一个转动自由度,外肢体臂的总体自由度由组成模块数量决定,模块可以快速连接和分离。模块化可重构外肢体机器人构型可变换,功能可根据任务需求进行配置,辅助进行支撑、观察、操作等功能辅助。图1(a)展示了单人进行头顶工件安装过程中,外肢体辅助支撑工件,以便操作人员进行工件的固定;图1(b)展示了单人进行大型工件装配,工件具有两个间隔较远的安装销轴,操作人员无法同时观察两个销轴的装配情况,操作人员仅观察其中上方销孔的安装情况,外肢体通过末端摄像头辅助观察下方销孔的对准情况,并将图像传输给操作人员佩戴的眼镜中,以便操作人员调整工件位姿,独立完成工件装配;图1(c)展示了操作人员双手抬箱子无法刷卡开门时,一条外肢体臂辅助操作人员刷门禁卡,另一条外肢体臂为操作人员开门的场景;图1(d)展示了单人焊接过程中,外肢体辅助夹持导线与电路板,同时可以辅助进行电路翻面与导线递送。

模块化外肢体机器人在结构上以基本模块单元为基础,每个模块单元具有一个独立的转动自由度,外肢体臂串联模块数量越多,其总体自由度越多,变换构型能力越强。如图2、3为模块化可重构外肢体机器人系统的总体展示。图2为外肢体机器人重构变形展示,图2(a)、(b)中分别是4模块串联的封闭环构型和6模块串联的封闭环构型,此种构型整体占用空间小,适用于收纳、保存和运输;图2(c)是由8模块串联而成的螺旋构型,此构型适合缠绕抓取长杆状构件;图2(d)、(e)、(f)是由8模块串联而成的链状构型,适用于复杂结构环境的避障操作、复杂管道内的探测等。图3为外肢体机器人的穿戴效果展示,其中每条外肢体臂由5个基本模块单元组成,总体具有5个自由度,可以辅助人体夹持递送物体。

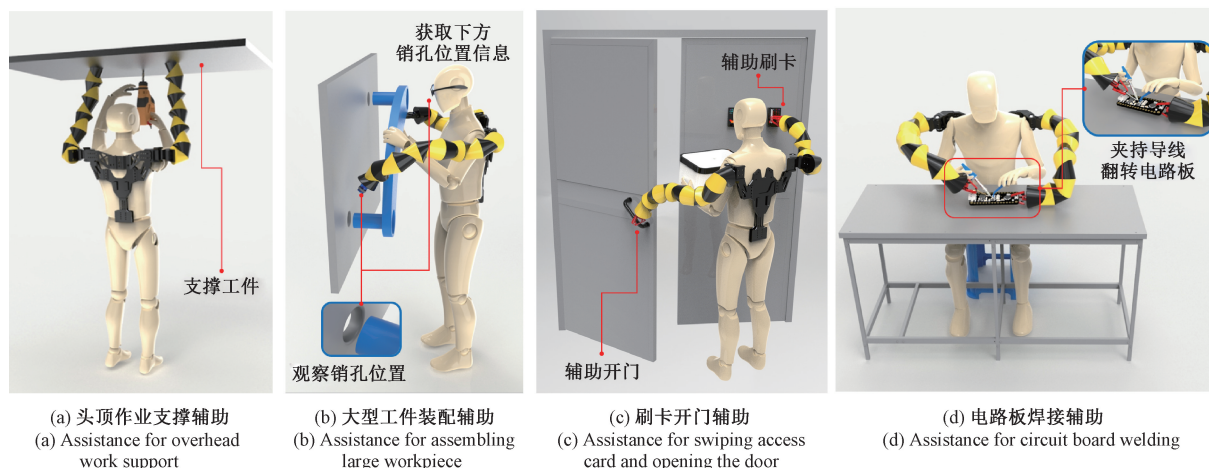


图 1 模块化可重构外肢体机器人概念

Fig. 1 Concept of the modular and reconfigurable supernumerary robotic limb



图 2 外肢体机器人重构展示

Fig. 2 Reconfiguration display of supernumerary robotic limb



图 3 外肢体机器人穿戴展示

Fig. 3 Wearing display of supernumerary robotic limb

综上所述,基本模块单元是模块化外肢体的结构组成与运动产生基础,两个模块间需要实现快速连接和分离,

同时多模块连续转动变形时不发生干涉,为了实现上述重构变形与穿戴展示效果,基本模块单元在结构设计上需要满足以下特性:1)良好的同构性与可互换性,每个模块的构型设计相同;2)结构紧凑、体积小、质量轻;3)快速可靠的连接与分离;4)电气系统的动态可靠连接。

为了满足上述单元模块结构设计上的基本要求,提出了一种由两个相同子模块通过转动连接构成的基本单元模块构型,每个子模块的构型都是由等腰直角三棱柱经边缘打磨成曲面而成,同时具有一个转动平面和一个连接平面。转动平面用于子模块之间的连接转动,子模块的转动平面相互重合,公共的转动轴垂直于两个转动平面,两个子模块成中心对称分布,可以绕公共转动轴进行 $-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 的相互旋转。连接平面用于模块单元之间的连接。

如图 4 所示,一个基本模块单元由两个子模块构成。每个子模块主要由壳体、端盖、一组连接磁铁、两组金属触点组成。两个子模块间通过舵机驱动系统转动连接。壳体是子模块的包络与支撑构件,形状类似表面光滑的楔形柱,采用光敏树脂 3D 打印制成以减轻重量。壳体 1 的连接平面上有圆形凹槽,与之对应壳体 2 的连接平面上有凸台。凸台与凹槽通过滚针轴承内外圈配合连接,实现子模块间的同轴转动。舵机固定在壳体 2 内部,壳体 1 与舵机的舵盘固连在一起。驱动部分采用 DYNAMXEL 系列舵机,集成了直流空心电机、减速器(减速比为 353.5:1)、非接触式绝对编码器(12BIT, 360°)、和微控制单元:ST CORTEX-M3 (STM32F103C8 @ 72MHZ, 32BIT)。单个模块单元的重量为 300 g。

此外,为了实现相邻模块单元之间的快速连接与分离,提出了基于磁性连接的快换设计。如图 5(a)~(c)所示,在子模块壳体 1 和壳体 2 的底面端盖上绕中心轴

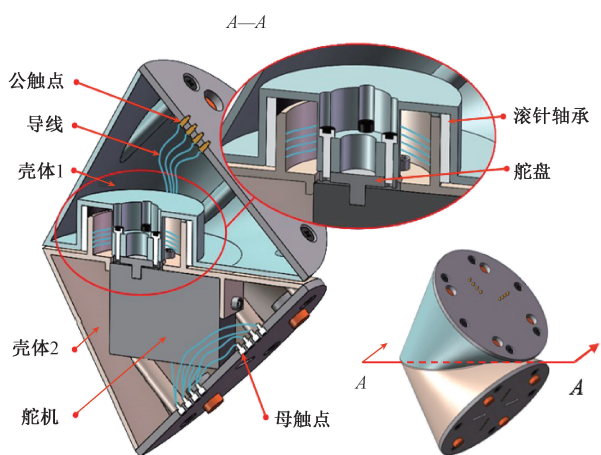


图4 基本模块单元机械结构设计

Fig. 4 Basic module unit mechanical structure design

分别均匀嵌入了4个圆柱形钕磁铁。当两个模块单元的底面相互靠近时,利用磁力吸附来产生并维持连接,磁力的对中性可以在实现快速连接的同时保证自动对准。此外,虽然磁性连接在钕磁铁柱轴向具有很强的连接能力,但是对连接面径向的载荷承受能力较弱,为了避免磁力连接因受到径向分力而失效,将端盖1上安装磁铁的圆柱孔加深,同时增大端盖2上的钕磁铁柱的高度,从而增加二者的有效接触长度。利用类似长轴(磁铁柱)与深孔(连接孔)的配合来承受模块单元之间的弯矩,提高连接的可靠性。

同时,为了实现电气系统的快速连接,设计了双排金属接触点间隔错位连接结构。如图5(e)~(f)所示,端盖1和端盖2上分别装有两组金属触点(每组4个),每组4个触点分别与驱动舵机的电气接口对应,其中两个代表电源线V+和V-,另外两个是485通信接口D+和D-。位于端盖1上的两组触点为动态触点(即内嵌弹簧的公头触点),为了实现两个模块单元以任意方位连接都能完成电气系统连接,设计每组4个动态触点沿连接平面径向等距布置,两组动态触点绕连接面中心点成90°错位分布;同时设计位于端盖2上的两组静态触点(即母头触点)成180°对称分布。当两个模块单元相互连接时,由于连接平面上的4个钕磁铁柱成圆周等距分布,两模块单元连接配置的最小错位角为90°,所以两模块单元连接配置共有4种情况,基于上述的动静态触点设计,可以保证两模块单元以任意一种方式连接,都会有一组动态触点与一组静态触点保持接触,从而实现相邻模块单元之间的电路连接与通信。同时如图5(d)所示,为了保证电气金属触点连接的可靠性,端盖1上的公头触点设计有内置弹簧,当相邻模块单元凭借磁力吸附连接上时,弹簧公头触点会被挤压与母头触点紧密接触,保证相邻模

块单元之间电气系统的可靠连接。综合上述基本模块单元的机械本体、电气连接、快速连接与分离等设计,进而实现模块单元间的“即连即用”。

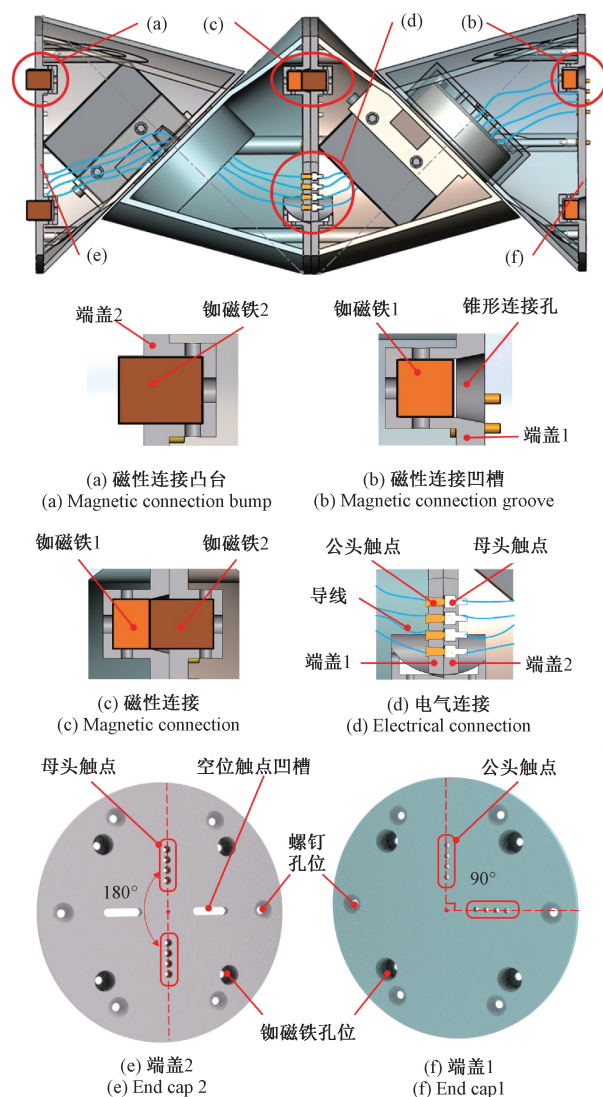


图5 基本模块单元连接设计

Fig. 5 Basic module unit connection design

2 外肢体运动分析

2.1 连接方位分析

根据连接平面上磁铁的圆周均布特性,相邻两个模块之间可以形成4种有效的构型配置关系,其连接形式如图6所示。如图6(a)所示的两模块单元的旋转轴(J1、J2)相互平行,设定这种连接关系为模块间相对转角 θ 为0°的初始状态(连接方位1);保持下边模块单元固定不动,依次将上边与之连接的模块单元整体旋转90°,从而得到其他3种连接关系(连接方位2、3、4)。如图6(b)~6(d)展示的是相邻模块单元相对转角 θ 为90°

和 270° 的连接关系,此时两模块单元旋转轴为空间异面关系;图 6(c) 中相邻模块的相对转角 θ 为 180° ,此时两模块单元旋转轴相互垂直。当在连接方位 4 基础上再旋转 90° ,此时相邻模块单元相对转角 θ 为 360° ,其配置方位与连接方位 1 一致,形成了连接方位 1~4 的周期性循环。综上所述,若外肢体臂由 $n(n \geq 1)$ 个模块单元串联组成,则外肢体臂将会有 $4n-1$ 种不同的构型配置方式。组成外肢体机器人的模块单元数量越多,外肢体的可变构型越丰富。

2.2 正向运动学分析

根据上述分析可知,两个模块串联有 4 种不同的配置方案,若在此基础上直接进行运动学建模就要考虑 4 种不同情况,当串联模块增多时,其连接构型配置情况成指数增长。所以,为了针对具有不同模块数量、任意配置方位的外肢体机器人,进行通用的正向运动学建模,引入虚拟转轴来辅助建模,如图 6 所示。图 6 中虚线代表的 AB 轴为构建的虚拟转轴,其穿过两模块连接平面的中心点,并垂直于连接平面。根据模块单元的结构设计可知,模块间是通过钕磁铁组进行磁吸式固定连接的,模块间不能连续转动,只能通过连接面上绕中心均匀分布的 4 个连接磁铁,实现步长为 90° 的非连续转动。所以,通过连接平面间虚拟转轴的建立,可以将模块连接方位的配置间接地转换成对应虚拟转轴的转动,避免了根据每一连接面的方位配置进行大量分类讨论,从而建立外肢体机器人正向运动学的普适性模型。

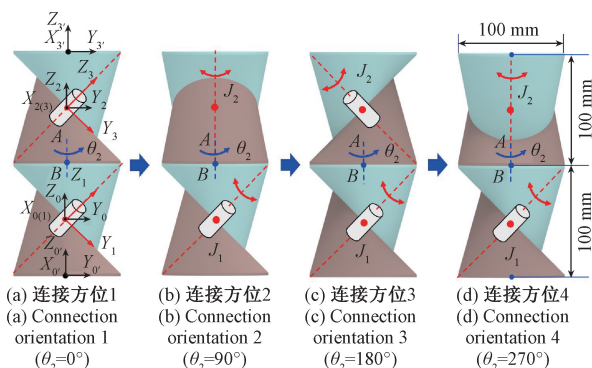


图 6 相邻模块 4 种连接方位及 DH 坐标系建立

Fig. 6 Four connection orientations of adjacent modules and establishment of DH coordinate system

如图 6 所示,两模块串联时,只有一个连接平面,所以只需构建一个虚拟转轴 AB 。图 6(a) 中双转轴为平行关系,定义为连接方位 1,其对应的 DH 坐标系建立如图 6(a) 中所示。模块单元处于未发生转动的初始状态时,每个模块单元可以近似看作一个圆柱体,该圆柱体底面直径 100 mm,高 100 mm。假设最底端模块与地面固定,其底端面中心点作为参考坐标系原点,参考坐标系的

XOY 平面与水平面平行,其 Z 轴竖直向上。末端操作点设定为最末端模块单元上端面中心点,三轴初始方向与地面参考系三轴方向一致。所构建的虚拟转轴为第 2 轴,对应的转动角为 θ_2 ,此时设定 $\theta_2 = 0^\circ$ 。当轴 AB 按图中所示转动方向逆时针转过 90° 、 180° 、 270° 时(即 $\theta_2 = 90^\circ$ 、 180° 、 270°),分别对应连接方位 2、3、4 三种连接关系。由此可以明确模块串联时各转动轴的取值范围:当转轴为模块单元实际转轴时,轴转角的理想取值范围为连续转动区间 $-180^\circ \sim 180^\circ$;当转轴为虚拟转轴时,其轴转角的取值范围为离散的角度值 0° 、 90° 、 180° 与 270° 。两模块串联时的 DH 参数值如表 1 中编号 1~3 所示。

表 1 外肢体机器人关节坐标系参数值

Table 1 Joint coordinate system parameters of the supernumerary robotic limb

编号 i	θ_i	α_{i-1}	l_{i-1}	d_i	θ_i 取值范围
1	0	$-\pi/4$	0	0	$-\pi \sim \pi$
2	0	$\pi/4$	0	100	$0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$
3	0	$-\pi/4$	0	0	$-\pi \sim \pi$
4	0	$\pi/4$	0	100	$0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$
5	0	$-\pi/4$	0	0	$-\pi \sim \pi$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$2n-2$	0	$\pi/4$	0	100	$0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$
$2n-1$	0	$-\pi/4$	0	0	$-\pi \sim \pi$

基于上述双模块串联条件下的坐标系建立,将其推广到 $n(n > 2)$ 个模块单元串联的情况,从而得到模块化外肢体串联模式下的正向运动学模型。当仅有两个模块单元串联时,系统中有两个实际转轴和一个虚拟转轴,其排列顺序为每两个实际转轴之间配有一个虚拟转轴,三轴的空间关系与转动情况可以由编号 1~3 对应的参数值进行表示,这是 n 个模块单元串联模型的基础。在双模块串联基础上,每增加一个模块单元,就多出一条虚拟转轴和一条实际转轴。所以,当 n 个模块单元串联时,一共有 $2n-1$ 条转轴(其中有 n 条实际转轴, $n-1$ 条虚拟转轴),实际转轴与虚拟转轴的参数值分别与表 1 中的对应参数值保持一致,从表 1 中可得。系统中从基座模块到末端模块的实际转轴,分别对应编号 $m(m = 2n-1)$ 的参数;系统中从基座模块到末端模块的虚拟转轴,分别对应编号 $m(m = 2n-2)$ 的参数。由此可以建立起 n 为任意值时的外肢体系统的正向运动学模型。

采用 DH 参数法对外肢体进行运动学建模,所建立的关节坐标系参数值如表 1 所示,模块单元的基本尺寸参数都是相同的,串联模块数量增加时,相邻两个模块之间的变换矩阵形式与对应的参数是相同的。运动学模型中,坐标系 $\{i\}$ 相对于坐标系 $\{i-1\}$ 的变换矩阵可以

用 ${}^{i-1}\mathbf{A}_i$ 表示,如式(1)所示。

$${}^{i-1}\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & l_{i-1} \\ \sin\theta_i\cos\alpha_{i-1} & \cos\theta_i\cos\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & -d_i\sin\alpha_{i-1} \\ \sin\theta_i\sin\alpha_{i-1} & \cos\theta_i\sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & d_i\cos\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: i 为基于DH参数法建立的坐标系对应序号,如图6(a)所示; θ 、 α 、 l 、 d 是坐标系对应的DH参数,其值如表1所示。

当模块化外肢体臂由 n 个模块单元串联时,其第 n 个模块虚拟转轴的坐标系 $\{2n-2\}$ 相对第一个模块的基坐标系 $\{0\}$ 的变换矩阵可以由 ${}^0\mathbf{T}_n$ 表示,如式(2)所示。随着 i 的递增,对应的变换矩阵依次右乘,可以得到 ${}^0\mathbf{T}_n$ 的具体表达式。其中,坐标系 $\{2n-2\}$ 相对基坐标系 $\{0\}$ 的3轴方向变换与坐标原点位移变换可以由变换矩阵 ${}^0\mathbf{T}_n$ 中 $\vec{n}$ 、 $\vec{o}$ 、 $\vec{\alpha}$ 和 $\vec{p}$ 来分别表示。

$${}^0\mathbf{T}_n = \prod_{i=1}^{2n-2} {}^i\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: n 为外肢体中串联模块单元的个数; $\vec{n}$ 、 $\vec{o}$ 、 $\vec{\alpha}$ 和 $\vec{p}$ 的表示如下 $\vec{n} = (n_x, n_y, n_z)'$, $\vec{o} = (o_x, o_y, o_z)'$, $\vec{a} = (a_x, a_y, a_z)'$, $\vec{p} = (p_x, p_y, p_z)'$ 。

所以末端操作点坐标系 $\{m'\}$ 相对于固定基座参考坐标系 $\{0'\}$ 的变换矩阵 ${}^0\mathbf{T}_{m'}$ 可以由式(3)表示。

$${}^0\mathbf{T}_{m'} = {}^0\mathbf{T}_0 \cdot {}^0\mathbf{T}_n \cdot {}^n\mathbf{T}_{m'} \quad (3)$$

式中: m' 为末端操作点坐标系序号, m 等于 $2n-1$; ${}^n\mathbf{T}_{m'}$ 为末端操作点坐标系 $\{m'\}$ 相对于第 n 个模块虚拟转轴的坐标系 $\{2n-2\}$ 的变换矩阵; ${}^0\mathbf{T}_0$ 为第一个模块的基坐标系 $\{0\}$ 相对于固定基座参考坐标系 $\{0'\}$ 的变换矩阵。

式(3)中的 ${}^0\mathbf{T}_0$ 和 ${}^n\mathbf{T}_{m'}$ 的坐标变换矩阵可以由式(4)与式(5)得到:

$${}^0\mathbf{T}_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 50 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$${}^n\mathbf{T}_{m'} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\pi/4) & -\sin(\pi/4) & -50\sin(\pi/4) \\ 0 & \sin(\pi/4) & \cos(\pi/4) & 50\cos(\pi/4) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

按照上述公式,针对相邻两实际转轴相互垂直的

连接方位下外肢体工作空间进行分析,基于外肢体的正向运动学模型,采用扫描法得到其理想工作空间。如图7所示,为5模块串联时对应的工作空间以及其在XY、YZ和XZ平面上的投影。其工作空间成椭球状,相对于YZ平面成对称分布,相对于YZ平面的两侧,其所能达到的位置是一样的。如图7(b)和(d)所示,工作空间在XY与XZ平面的投影形状近似圆形。如图7(c)所示,在YZ面上的投影类似矩形,其短边周围角度成圆滑曲线过渡。因为,外肢体工作空间相对YZ平面对称分布,所以针对YZ平面投影情况进行分析。图7(c)中的工作空间投影四周边界点分别为 $A(100, -300)$ 、 $B(450, 50)$ 、 $C(0, 500)$ 、 $D(-350, 150)$,在Y与Z方向上的可达位置区间分别为 $-350 \sim 450$ mm与 $-300 \sim 500$ mm,其量程为800 mm。由图可得,YZ平面投影相对I、III象限的角平分线成对称分布。其工作空间主要集中在I、II和IV象限,第III象限的分布较少。

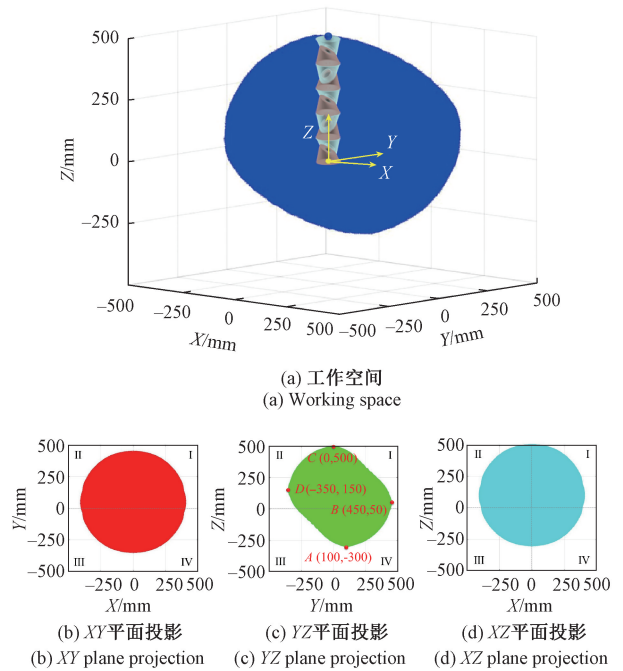


图7 工作空间分析

Fig. 7 Working space analysis

当模块数量确定、模块间连接方位确定的情况下,外肢体的工作空间随之确定,具体使用时所能达到的实际空间位置只与外肢体首端模块相对于固定基座的安装方位有关,结合外肢体的工作空间与应用需求,可以对外肢体的使用安装提供参考。当模块数量发生改变时,以新添加模块为例,外肢体模块数量变多,总体自由度增加,其工作空间也随之变大。

3 试验与测试

3.1 模块基本能力试验

模块单元是外肢体臂运动控制实现的基础,首先对

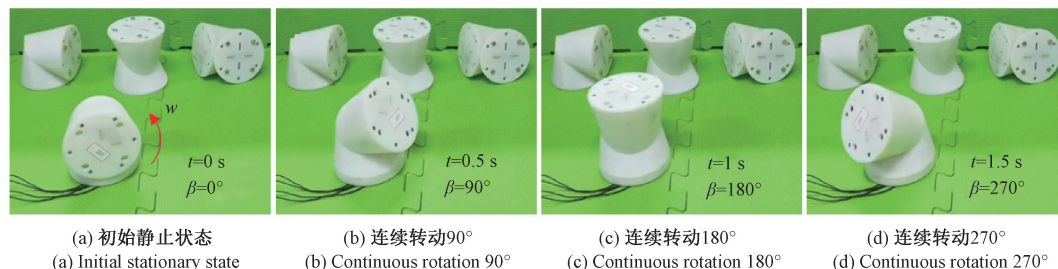
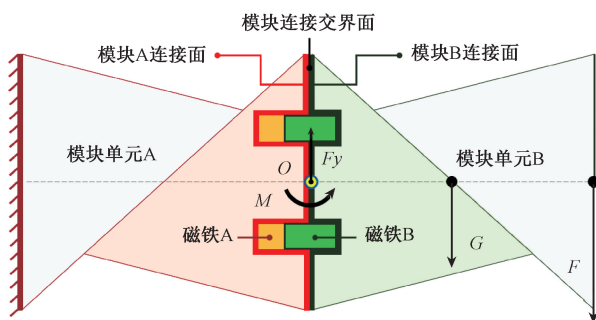
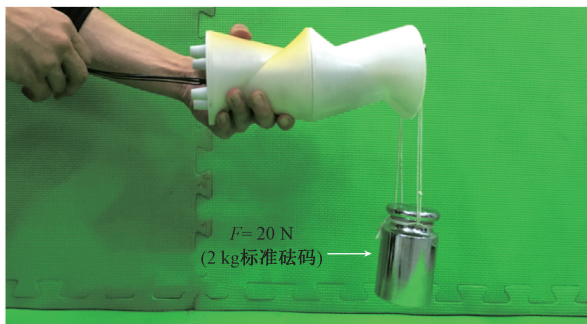


图8 模块单元转动能力试验
Fig. 8 Module unit rotation capacity test

针对模块间机械连接的可靠程度,进行了模块单元的承载能力测试,以两个模块单元连接为例,如图9(a)所示,模块单元A左侧与固定基座相连,右侧与模块B串联,模块B除了受自身重力 G 之外,外部负载力 F 作用在其右侧端面中心,模块A对模块B的作用可以等效为作用力 F_y 与力矩 M (相对模块B连接面中心点 O)。



(a) 连接模块受力情况说明
(a) Description of the force applied to the connection modules



(b) 承载能力测试
(b) Carrying capacity test

图9 模块单元承载能力试验

Fig. 9 Carrying capacity test of the module unit

其基本能力进行相关试验。舵机的最大转速为30 r/min,设置舵机在最大速度下工作,运行中模块不出现卡顿,数据传输稳定,此时单模块运动最大角速度为 π (rad/s),其运动过程示意图如图8所示。

当模块B保持连接并处于静止状态时,上述所有力与力矩(相对 O 点)的总和为0,在此状态下外部负载力 F 能够到达的最大值为模块单元的承载极限。图9(b)为模块的承载能力测试,图9(b)中展示了连接模块末端加载2 kg标准砝码的情况,此时两模块仍能保持稳定的连接状态,由此可以得出模块单元的承载能力不少于20 N。

针对模块的快速连接能力进行了测试,快速连接过程如图10所示。图10(a)~(c)展示了外肢体末端模块的“即连”性,图10(a)中外肢体穿戴在操作人员身上,外肢体右臂串联4个基本模块单元,初始时保持静止状态,由操作人员为其添加具有末端执行工具的模块;图10(b)中,操作人员单手拿住新增模块,确定新增模块连接面上的磁铁与被连模块连接面上的磁铁方向大致对应,同时使其逐渐靠近外肢体末端的被连模块,两个模块会在磁铁对中吸力下完成自动的方位对准与连接;图10(c)是外肢体完成添加末端模块后的连接状态;结合图10(c)与(d)展示了外肢体完成连接末端模块后,控制末端模块连续转动一定角度,此时图10(d)中末端手抓的空间位置与姿态发生了变化,证明了连接后外肢体可以正常运动,体现了外肢体连接新模块后的“即用”性。

3.2 外肢体辅助递送试验

针对外肢体辅助操作人员递送周身物品的能力进行了试验,试验中模块化外肢体穿戴在操作人员肩部。操作人员进行两条导线的焊接工作,此时操作人员双手都被占用,无法同时处理焊接过程中的额外工作,例如在焊接过程中需要接听电话。如图11所示,外肢体机器人左臂夹持一条导线辅助操作人员进行两条导线焊接,此时当装在兜中的手机突然响起时,外肢体机器人右臂

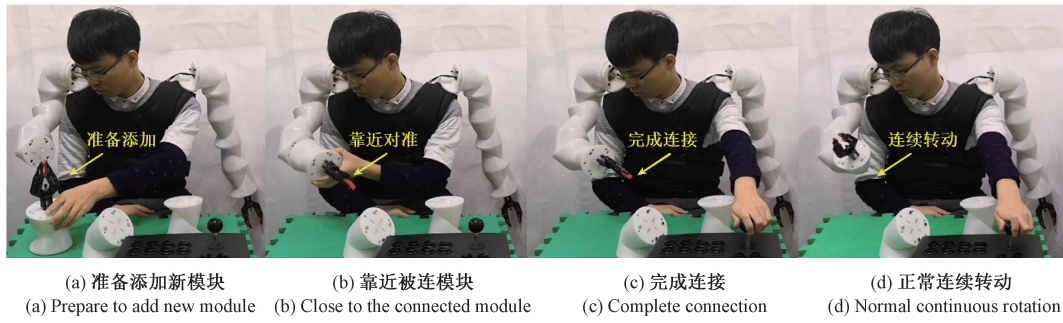


图10 模块快速连接能力试验

Fig. 10 Module fast connection capability test

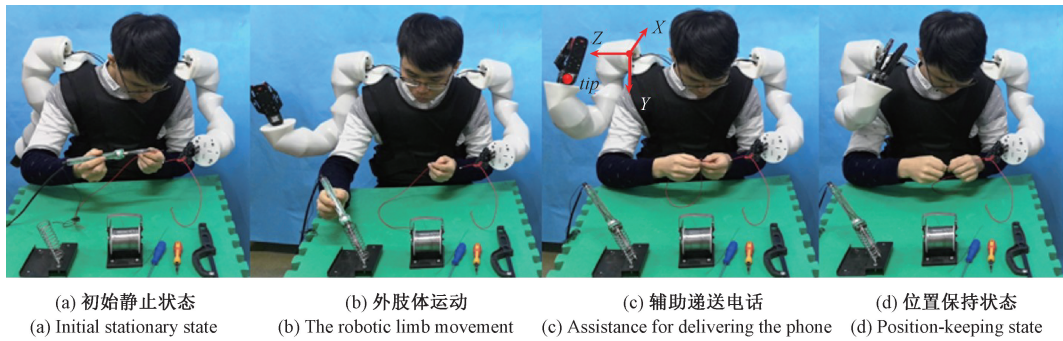


图11 外肢体机器人辅助递送能力试验

Fig. 11 Delivery assistance capability test of the supernumerary robotic limb

辅助人体拿取手机并递送至耳边进行接听。实验中外肢体由5个基本模块单元串联而成,末端模块装有1个自由度的夹持手抓,从肩部的基座模块到末端操作模块依次对应外肢体的关节1~5,其基座坐标系的轴方向如图11(c)所示,其中末端操作模块端面中心点设定为tip。目前采用固定轨迹规划对外肢体臂进行控制,关节角度通过示教方法获得。实验中外肢体左臂夹持导线,

保持位置固定不动,辅助操作人员进行导线的焊接工作。外肢体右臂末端执行工具夹持手机,初始状态下外肢体自然竖直下垂,然后抓持人体髋关节附近手机,经由人体右侧自由空间,运动至末端接近人体右耳侧接听电话,再返回起始点的过程。其中,外肢体右臂的各关节运动轨迹如图12(a)所示,与基座固连的关节1角度变化不大,主要由前4个关节完成了辅助递送的功能。图12(b)所

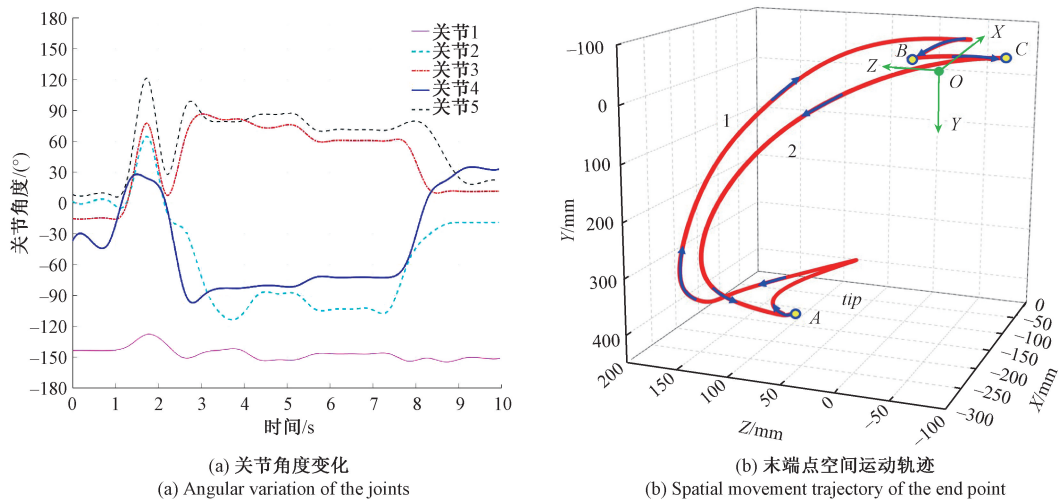


图12 外肢体机器人各关节角度变化及末端点空间运动轨迹

Fig. 12 Angular variation of the supernumerary robotic limb joints and the spatial movement trajectory of the end point

示为外肢体末端模块中心点 tip 在空间中的运动轨迹。结合图 11(c)和 12(b)分析,图中 O 点为坐标原点,外肢体基座模块单元的连接面中心与 O 点重合,同时第一实际转轴沿角 YOZ 平分线方向布置,可以得到基座的坐标系,将二图中的坐标系重合。 A 点为初始点,即外肢体自然竖直下垂时末端模块中心点 tip 的位置,外肢体臂末端点沿着箭头方向运动,经由轨迹 1 运动到 B 点,运动过程中手机的位置在初始点靠后(沿 X 轴正方向),所以图 12(b)中从 A 点开始运动后,先沿 X 正方向运动再返回,形成了一个拐点;在 B 点处外肢体末端有短暂的停留,以便操作人员完成电话的接通,接通后外肢体末端模块中心点 tip 沿 Z 轴负方向运动到 C 点进行辅助接听通话,当通话结束后外肢体的末端模块中心点 tip 由 C 点经由轨迹 2 快速返回初始 A 点。

4 结 论

本文提出并研制了一种可穿戴、模块化、可重构外肢体机器人,外肢体机器人可以作为人体额外上肢进行操作辅助。设计了构型相同、可互换的基本模块单元,实现了模块间机械与电气系统快速可靠的连接和分离。针对相邻两模块间的连接方位配置进行了分析,面向包含任意模块数量、不同配置方位的外肢体,采用虚-实转轴结合的方法,建立了其通用的正向运动学模型。针对构成外肢体的模块单元的转动、承载以及连接能力进行了试验。对外肢体辅助递送能力进行了演示试验。验证了所提出的新型模块化外肢体机器人具有快速连接、变换构型、辅助操作的能力。

本文中的外肢体的辅助控制是通过示教实现的,未来将针对不同辅助作业场景,重点研究外肢体自主运动控制与人机多臂协同作业等问题。

参考文献

- [1] 郑天骄,朱延河,高清松,等. 面向静态稳定的可变形助行外骨骼机器人运动规划[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(1):95-102.
ZHANG T J, ZHU Y H, GAO J S, et al. Static stability-oriented motion planning for a deformable walking assistance exoskeleton robot [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(1):95-102.
- [2] 胡鸿越,胡立坤,刘贻达,等. 一种柔性下肢外骨骼控制策略研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(3):184-191.
HU H Y, HU L K, LIU Y D, et al. Control method for the soft lower limb exosuit [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(3):184-191.
- [3] 王亚宾,张小栋,穆小奇,等. 用于助老伴行机器人的老年人摔倒预测方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(7):1-7.
WANG Y B, ZHANG X D, MU X Q, et al. Research on the prediction method of elderly fall-down for elderly-assistant and walking-assistant robot [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(7):1-7.
- [4] LLORENS-BONILLA B, PARIETTI F, ASADA H H. Demonstration-based control of supernumerary robotic limbs [C]. Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012, DOI: 10.1109/IROS.2012.6386055.
- [5] DAVENPORT C, PARIETTI F, ASADA H H. Design and biomechanical analysis of supernumerary robotic limbs [C]. Asme Dynamic Systems & Control Conference Joint with the Jsme Motion & Vibration Conference, 2012, DOI: 10.1115/DSCC2012-MOVIC2012-8790.
- [6] 荆泓玮,朱延河,赵思恺,等. 外肢体机器人研究现状及发展趋势[J]. 机械工程学报, 2020, 56(7):1-9.
JING H W, ZHU Y H, ZHAO S K, et al. Research status and development trend of supernumerary robotic limbs [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(7):1-9.
- [7] PARIETTI F, CHAN K, ASADA H H. Bracing the human body with supernumerary robotic limbs for physical assistance and load reduction [C]. 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE, 2014, DOI: 10.1109/ICRA.2014.6906601.
- [8] PARIETTI F, ASADA H H. Supernumerary robotic limbs for human body support [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2016, 32(2):301-311.
- [9] PARIETTI F, CHAN K C, HUNTER B, et al. Design and control of supernumerary robotic limbs for balance augmentation [J]. Proceedings-IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2016, 2015:5010-5017.
- [10] PARIETTI F, ASADA H H. Supernumerary robotic limbs for aircraft fuselage assembly: Body stabilization and guidance by bracing [C]. 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE, 2014, DOI: 10.1109/ICRA.2014.6907002.
- [11] BONILLA B L, ASADA H H. A robot on the shoulder: Coordinated human-wearable robot control using coloured petri nets and partial least squares predictions [C]. 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2014, DOI: 10.1109/ICRA.2014.6906598.
- [12] SASAKI T, SARAJI M Y, FERNANDO C L, et al.

- MetaLimbs: Metamorphosis for multiple arms interaction using artificial limbs[C]. ACM Siggraph 2017 Posters, 2017, DOI: 10.1145/3102163.3102166.
- [13] SASAKI T, SARAJI M Y, FERNANDO C L, et al. MetaLimbs: Multiple arms interaction metamorphism[C]. ACM SIGGRAPH 2017 Emerging Technologies, 2017, DOI: 10.1145/3084822.3084837.
- [14] VATSAL V, HOFFMAN G. Wearing your arm on your sleeve: Studying usage contexts for a wearable robotic forearm[C]. 2017 26th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN), IEEE, 2017, DOI: 10.1109/ROMAN.2017.8172421.
- [15] ZHANG Q H, ZHU Y H, ZHAO X, et al. Design of reconfigurable supernumerary robotic limb based on differential actuated joints[J]. International Journal of Computer and Information Engineering, 2020, 14(4): 115-122.
- [16] HAO M, ZHANG J, CHEN K, et al. Supernumerary robotic limbs to assist human walking with load carriage[J]. ASME Journal of Mechanisms and Robotics, 2020, 12(6): 061014.
- [17] GOPINATH D, WEINBERG G. A generative physical model approach for enhancing the stroke palette for robotic drummers[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2016, 86: 207-215.
- [18] BRETAN M, GOPINATH D, MULLINS P, et al. A robotic prosthesis for an amputee drummer[J]. ArXiv Preprint, 2016, ArXiv:1612.04391.
- [19] VERONNEAU C, DENIS J, LEBEL L P, et al. Multifunctional remotely actuated 3-DOF supernumerary robotic arm based on magnetorheological clutches and hydrostatic transmission lines[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020(99):1-1.
- [20] WU F Y, ASADA H H. 'Hold-and-manipulate' with a single hand being assisted by wearable extra fingers[J]. Proceedings-IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2015:6205-6212.
- [21] LEIGH S W, MAES P. Body integrated programmable joints interface[C]. 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, ACM, 2016, DOI: 10.1145/2858036.2858538.
- [22] CUNNINGHAM J, HAPSARI A, GUILLEMINOT P, et al. The supernumerary robotic 3rd thumb for skilled music tasks[C]. 2018 7th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics (Biorob), IEEE, 2018, DOI: 10.1109/BIOROB.2018.8487609.
- [23] TIZIANI L, HART A, CAHOON T, et al. Empirical characterization of modular variable stiffness inflatable structures for supernumerary grasp-assist devices[J]. The International Journal of Robotics Research, 2017, 36(13-14): 1391-1413.
- [24] HU Y, LEIGH S, MAES P. Hand Development kit: Soft robotic fingers as prosthetic augmentation of the hand[C]. 2017 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, 2017, DOI:10.1145/3131785.3131805.
- [25] NGUYEN P H, SPARKS C, NUTHI S G, et al. Soft poly-limbs: Toward a new paradigm of mobile manipulation for daily living tasks[J]. Soft Robotics, 2018, 6(1): 38-53.

作者简介



赵思恺, 2013 年于哈尔滨工业大学获得学士学位, 2016 年于南京理工大学获得硕士学位, 现为哈尔滨工业大学博士研究生, 主要研究方向为模块化可重构外肢体机器人。
E-mail: zhaosikai1990@163.com

Zhao Sikai received his B. Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 2013 and M. Sc. degree from Nanjing University of Science and Technology in 2016. Now, he is a Ph. D. student in Harbin Institute of Technology. His main research interest is modular and reconfigurable supernumerary robotic limbs.



朱延河(通信作者), 分别在 1998 年、2000 年和 2004 年于哈尔滨工业大学获得学士、硕士和博士学位, 现为哈尔滨工业大学教授, 主要研究方向为外肢体机器人、外骨骼机器人、模块化可重构机器人。
E-mail: yhzhu@hit.edu.cn

Zhu Yanhe (Corresponding author) received his B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Harbin Institute of Technology in 1998, 2000 and 2004, respectively. Now, he is a professor in Harbin Institute of Technology. His main research interest includes supernumerary robotic limbs, exoskeleton robot and modular reconfigurable robot.